

# 波段多普勒天气雷达 特征及临近预警


主编：杨淑华 副主编：赵桂香 苗爱梅

C Boduan  
Duopule Tianqi  
Leida Tezheng ji  
Linjin Yujing

# C 波段多普勒天气雷达特征及 临近预警

主 编：杨淑华

副主编：赵桂香 苗爱梅

 气象出版社  
China Meteorological Press

## 内 容 简 介

强对流天气具有时间短、尺度小的特点,在常规天气图上很难捕捉到。充分运用多普勒天气雷达的反射率因子图、径向速度图及其各种导出产品,可以获取丰富的强对流天气信息,能够较为准确和及时地监测灾害性天气。本书以C波段多普勒天气雷达为研究基础,充分阐述C波段多普勒天气雷达对各种不同灾害性天气的预报能力,并结合天气个例对各种回波特征进行详细分析。

### 图书在版编目(CIP)数据

C波段多普勒天气雷达特征及临近预警 / 杨淑华主编

— 北京 : 气象出版社, 2018.9

ISBN 978-7-5029-6227-2

I. ①C… II. ①杨… III. ①C波段-多普勒天气雷达-研究 IV. ①TN958

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第217208号

---

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街46号 邮政编码: 100081

电 话: 010-68407112(总编室) 010-68408042(发行部)

网 址: <http://www.qxcbs.com>

E-mail: [qxcbs@cma.gov.cn](mailto:qxcbs@cma.gov.cn)

责任编辑: 马 可 张 斌

终 审: 吴晓鹏

责任校对: 王丽梅

责任技编: 赵相宁

封面设计: 博雅思企划

印 刷: 北京建宏印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

印 张: 10

字 数: 256千字

版 次: 2018年9月第1版

印 次: 2018年9月第1次印刷

定 价: 60.00元

---

《C 波段多普勒天气雷达特征及临近预警》  
编委会

主 编：杨淑华

副主编：赵桂香 苗爱梅

编 委：魏建军 杨艳平 宋世华 戴有学 吴 亮

# 前 言

强对流天气具有时间短、尺度小、暴发突然等特点,在常规天气图上难以捕捉到。近年来,随着多普勒技术发展,多普勒天气雷达的反射率因子、径向速度及各种导出产品,提取丰富的强对流天气信息,准确和及时地监测灾害天气、特别是在风灾和雹灾相伴随的短时临近预报中发挥了重要作用。

本书以 C 波段多普勒天气雷达为研究基础,充分阐述 C 波段多普勒天气雷达对各种不同灾害性天气的预报预警能力,并结合天气个例对各种回波特征进行了详细分析。

全书共分为 9 章。第 1 章和第 2 章分别介绍了 C 波段多普勒天气雷达的扫描方式、产品显示方式、常用产品特征及其在业务应用中的注意事项;第 3 章介绍了判断多普勒天气雷达位置常用的两种方法及在业务应用中的误区;第 4 章分析了 C 波段多普勒天气雷达的附加特征——“V”形缺口,并结合个例阐述“V”形缺口形成、发展和消亡各个阶段特征;第 5 章对 C 波段多普勒天气雷达探测能力进行分析;第 6 章对 C 波段多普勒天气雷达冰雹特征进行统计分析;第 7 章对多普勒天气雷达径向速度在短时临近预报预警中的应用进行分析,并将造成强对流天气的中小尺度系统分成 8 类并结合个例详细分析和阐述;第 8 章详细分析强降雪天气的多普勒天气雷达特征,并对 2009 年到 2015 年共 8 次强降雪过程的多普勒天气雷达特征进行分析和总结,得出有指导意义的预报指标;第 9 章将多普勒天气雷达与卫星云图综合起来进行分析,分别阐述这两种探测手段的优缺点以及在业务中如何将二者有机结合运用。

以上 9 章内容,全面系统地阐述了 C 波段多普勒天气雷达基本产品和导出产品特征及其在短时临近预报预警业务中的应用。书中的结论均由实际应用获得,对 C 波段多普勒天气雷达应用有较好的参考价值。

由于编写水平有限,不足之处,敬请批评指正。

编者  
2018 年 8 月 16 日

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 C 波段多普勒天气雷达扫描方式</b> .....	(1)
1.1 体积扫描定义 .....	(1)
1.2 多普勒天气雷达产品的显示方式 .....	(1)
<b>第 2 章 C 波段多普勒天气雷达常用产品简介</b> .....	(2)
2.1 反射率因子 .....	(2)
2.2 平均径向速度 .....	(3)
2.3 速度方位角显示风廓线产品 .....	(3)
2.4 回波顶 .....	(4)
2.5 组合反射率因子 .....	(4)
2.6 垂直积分液态含水量 .....	(5)
2.7 风暴追踪信息 .....	(6)
2.8 降水量产品 .....	(7)
2.9 中气旋 .....	(8)
2.10 垂直剖面图 .....	(9)
2.11 典型个例分析——解析一次超级单体(超单)风暴过程的维持机理 .....	(9)
<b>第 3 章 判断多普勒天气雷达位置</b> .....	(13)
3.1 根据雷达特殊区域——静椎区判断雷达位置 .....	(13)
3.2 根据剖面图横坐标特征判断雷达位置 .....	(14)
3.3 典型个例分析——2008 年 6 月 27 日强对流 .....	(16)
3.4 典型个例分析——“2010-06-16”飚线大风多普勒雷达特征分析 .....	(21)
3.5 个例分析——山西北部两次强对流天气对比分析 .....	(26)
<b>第 4 章 “V”形缺口特征</b> .....	(30)
4.1 “V”形缺口选取遵循原则 .....	(30)
4.2 “V”形缺口统计特征 .....	(30)
4.3 典型个例分析——“2013-06-04”强对流天气特征分析 .....	(33)
4.4 典型个例分析——“2015-07-04”强对流天气特征分析 .....	(42)
4.5 本章小结 .....	(48)
<b>第 5 章 C 波段多普勒天气雷达探测能力分析</b> .....	(49)
5.1 锋面系统探测能力分析 .....	(49)
5.2 低空急流探测能力分析 .....	(51)
5.3 入流急流探测能力分析 .....	(51)

5.4	大尺度切变线探测能力分析	(52)
5.5	中小尺度天气系统探测能力分析	(53)
5.6	典型个例分析——“2016-06-13”华北飚线过程的多普勒雷达回波特征	(58)
5.7	典型个例分析——“2014-09-01”强对流中尺度机制分析及临近预警	(66)
5.8	典型个例分析——“2014-07-29”山西南部致灾飚线机制分析	(70)
<b>第 6 章</b>	<b>C 波段天气雷达冰雹特征分析</b>	<b>(76)</b>
6.1	雹云的基本反射率特征与回波顶特征	(76)
6.2	雹云低层平均径向速度特征	(76)
6.3	三体散射特征	(78)
6.4	雹云垂直液态含水量(VIL)特征	(81)
6.5	风廓线产品(VWP)特征	(81)
6.6	中气旋产品(M)特征	(81)
6.7	冰雹指数(HI)产品特征	(82)
6.8	雹云的基本反射率垂直剖面图特征	(82)
6.9	雹云的径向速度垂直剖面图特征	(82)
6.10	本章小结	(83)
<b>第 7 章</b>	<b>雷达径向速度在短时临近预报预警中应用分析</b>	<b>(84)</b>
7.1	应用多普勒天气雷达平均径向速度注意事项	(84)
7.2	中小尺度系统种类	(84)
7.3	逆风区型	(84)
7.4	中尺度气旋型	(95)
7.5	中小尺度西南急流型	(96)
7.6	西北气流+中尺度辐合线型	(96)
7.7	西南气流+西北气流+中尺度辐合线型	(98)
7.8	中尺度辐合线持续型	(99)
7.9	西北气流后部+西南急流型	(100)
7.10	气旋性辐合线型	(102)
7.11	本章小结	(103)
<b>第 8 章</b>	<b>强降雪天气多普勒雷达特征分析</b>	<b>(104)</b>
8.1	反射率因子特征	(104)
8.2	回波顶特征	(107)
8.3	径向速度场特征	(108)
8.4	根据径向速度判断低空急流	(111)
8.5	根据径向速度判断逆风区	(112)
8.6	根据径向速度判断中高空暖湿急流	(113)
8.7	典型个例分析——“2009-11-09”强降雪多普勒雷达散度分析	(114)
8.8	典型个例分析——“2011-04-01”山西北部暴雪过程诊断分析	(118)
<b>第 9 章</b>	<b>多普勒雷达与卫星云图综合应用分析</b>	<b>(126)</b>
9.1	个例分析——“2010-07-10”干侵入水汽图像和雷达特征分析	(126)

---

9.2 个例分析——“2015-08-07”龙卷过程卫星和雷达资料分析 .....	(131)
9.3 个例分析——“2013-09-12”秋季强对流天气综合分析 .....	(140)
9.4 卫星云图特征分析 .....	(141)
9.5 多普勒天气雷达特征分析 .....	(143)
9.6 本例小结 .....	(145)
参考文献 .....	(147)



# 第1章 C波段多普勒天气雷达扫描方式

## 1.1 体积扫描定义

C波段多普勒天气雷达采用体积扫描方式工作(缩写为VCP,简称“体扫”),有两种扫描模式,一种是降水模式,另一个是空模式。在日常业务中C波段多普勒天气雷达通常采用降水模式,即VCP11和VCP21扫描方式。

VCP11扫描方式规定在5分钟内对14个具体仰角进行扫描,分别为:0.5°、1.45°、2.4°、3.35°、4.3°、5.25°、6.2°、7.5°、8.7°、10.0°、12.0°、14.0°、16.7°、19.5°。

VCP21扫描方式规定在6分钟内对9个具体仰角进行扫描,分别为:0.5°、1.45°、2.4°、3.35°、4.3°、6.0°、9.9°、14.6°、19.5°。

## 1.2 多普勒天气雷达产品的显示方式

多普勒天气雷达产品的显示方式有三种,PPI显示方式、RHI显示方式和VOL显示方式。PPI是平面位置显示,即做仰角固定后的圆周扫描;RHI是距离高度显示,即做方位固定后的高低扫描;而VOL显示则是连续增加角度的圆周扫描。这三种扫描方式不同,数据格式也完全不同,所以无法通用。需要注意的一点是,尽管在体积扫描基数据中可以看到某一个仰角的圆周扫描图(即PPI),但不意味着体积扫描是由一个个PPI扫描完成后组合起来的。在日常业务中,为了组网拼图的需要,全国统一使用PPI格式进行扫描。

## 第2章 C波段多普勒天气雷达常用产品简介

在日常业务运用中,C波段多普勒天气雷达常用产品有15种,见表2.1。下面详细介绍其中的10种产品。

表 2.1 C波段多普勒天气雷达常用产品

产品名称	产品标识符	产品标识号
反射率因子	R	19—20
平均径向速度	V	26—27
组合反射率因子	CR	37—38
回波顶	ET	41
垂直积分液态含水量	VIL	57
风暴相对平均径向速度	SRM	56
风暴追踪信息	STI	58
冰雹指数	HI	59
中气旋	M	60
1小时降水累计雨量	OHP	78
3小时降水累计雨量	THP	79
风暴总降水量	STP	80
反射率因子剖面	RCS	50
平均径向速度剖面图	VCS	51
速度方位角显示风廓线产品	VWP	48

### 2.1 反射率因子

反射率因子是测量云中含水量多少的图像产品,是雷达天线沿 $360^{\circ}$ 无缝隙扫描时所得到的回波强度数据。在体积扫描中每个仰角都可以得到强度数据。如图2.1a中反射率因子越大的地方天气越激烈。

反射率因子有以下四个特征:

- (1)分辨率可达1 km。
- (2)探测距离可达230 km(R19)和460 km(R20)。
- (3)仰角扫描区间: $0.5^{\circ}\sim 19.5^{\circ}$ 。

(4)用途:估算降水强度、冰雹的潜在性、风暴结构以及确定边界层位置,对各种业务应用都十分有效。

需要注意:从雷达测站开始,距离雷达越远,斜距越远,距离地面的高度越高,沿着径线上的任何两点都不在一个平面上。

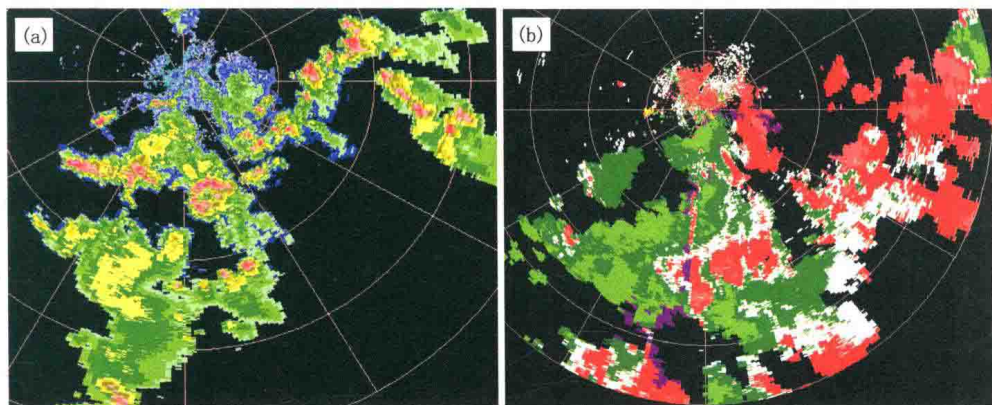


图 2.1 C波段多普勒天气雷达基本反射率因子(a)平均径向速度(b)

## 2.2 平均径向速度

平均径向速度是度量脉冲体积内空气和降水粒子运动的功率加权的径向分量,是测量实际风沿雷达径向分量的图像产品,在每个仰角上都可以采集到(见图 2.1b)。

平均径向速度有以下四个特征:

- (1)分辨率可达 0.5 km。
- (2)探测范围可达 115 km(V26)和 230 km(V27)。
- (3)仰角扫描区间:0.5°~19.5°。

(4)用途:用于估算风向风速和热对流,识别风切变和边界层,确定辐合、辐散、涡流、下击暴流和强天气特征区域范围。

需要注意:平均径向速度是指真实速度沿着扫描射线方向分量,从雷达测站开始,距离雷达越远,斜距越远,距离地面的高度也越高。沿着径线上的任何两点都不在一个平面上。

局限性:一是垂直于雷达波束的平均径向速度表示为“0”;二是距离折叠和速度退模糊不正确时会使径向速度存在较大误差,在应用中要注意。

## 2.3 速度方位角显示风廓线产品

风廓线是平均水平风随高度变化的图形显示产品,横坐标为时间,纵坐标为高度。最多可显示的高度层数为 30 层,每层间隔为 0.3 km,色标代表拟合的均方根误差。图 2.2 为 2010 年 7 月 10 日山西省大同地区出现雷雨大风和冰雹天气的垂直风廓线图,图中多处出现“ND”。“ND”表示无记录或记录不可信(风向变化太快)。通常在大面积降水情况下才能得到比较完整的风廓线产品,在强对流天气情况下风廓线常常不太完整。

用途:识别各个高度上的急流,判断冷暖平流、垂直风切变、锋面及其在垂直方向上的深度

和风暴相对速度等。

特别注意:这个产品在以测站为原点半径 30 km 探测范围内有效,这个区域以外地区不适用该产品。

### 2.4 回波顶

多普勒天气雷达在工作时,只有当反射率因子强度 $\geq 18$  dBZ 时,它所对应的最高仰角的高度才被记录下来,即为回波顶高度。它的分辨率为 4 km,有效探测范围为 230 km。

用途:最大回波顶所在的位置常常是最强烈天气发生区域,可以用它确定多单体风暴结构中各单体回波顶。根据对山西省大同地区 C 波段天气雷达 2007—2017 年多普勒雷达资料分析,当回波顶超过 11 km 就非常容易出现强对流天气,可以作为强对流天气短时临近预报预警指标。

如图 2.3 所示,回波顶大于 12 km 区域出现了强烈的对流天气,小时雨强大于 10 mm,冰雹直径大于 4 mm。

缺点:在雷达站附近由于受到静锥区影响,风暴回波顶高往往会被过低估计,在应用中需要注意。

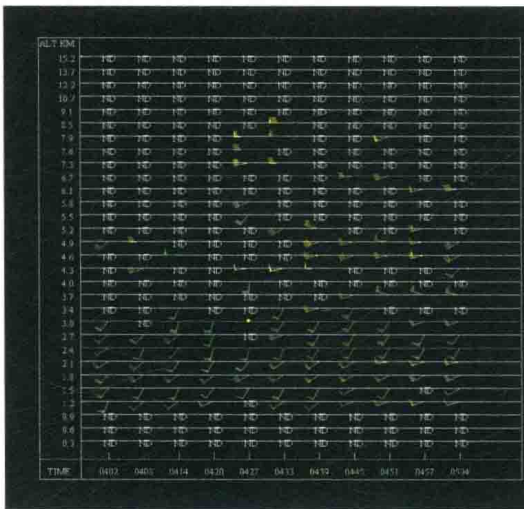


图 2.2 C 波段多普勒天气雷达风廓线



图 2.3 C 波段多普勒天气雷达回波顶

### 2.5 组合反射率因子

组合反射率表示的是在一个体扫中,从低层到高层选择一个最大反射率因子投影在笛卡尔格点上的产品。分辨率可达 1 km。显示范围和基本反射率因子一样,达 230 km(R37)或 460 km(R38)。

用途:它可以快速获知当前体扫最强反射率因子,在业务运用中对强对流分析快速有效。

注意:使用时要和风暴追踪信息、风暴属性表和中气旋等叠加使用。

缺点:

(1)不能判断最强反射率因子所在高度。

(2)没有相应的径向速度场配合,无法判断回波的生消情况。

(3)由于常常被较强回波掩盖,所以在识别具有空间结构回波特征时有一定难度,如对灾害天气有显著指示意义的低层钩状回波和弱回波区等。

个例分析:2010年6月19日大同市浑源县出现强对流天气,在18:05 1.5°仰角基本反射率因子图上可以看到明显的钩状回波结构及旁瓣回波,而且后侧入流急流很清楚(见图2.4a)。对应在同时刻的组合反射率上,钩状回波结构、旁瓣回波和后侧入流急流都不清晰(见图2.4b)。

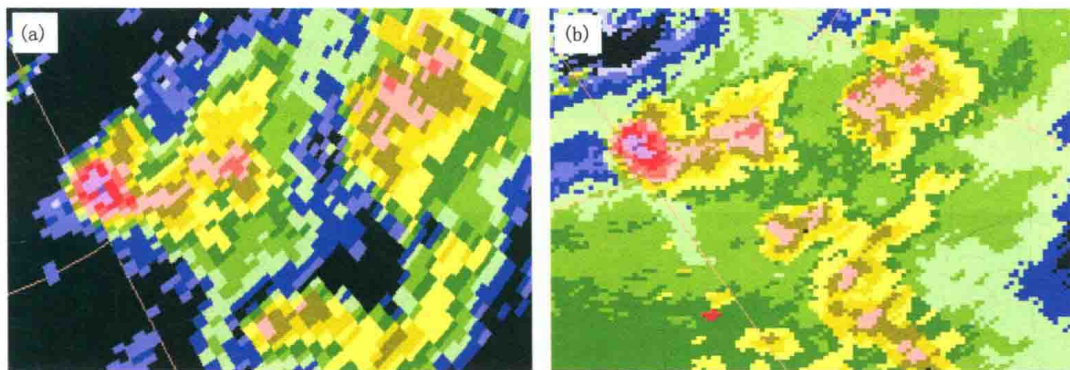


图2.4 2010年6月19日大同市浑源县C波段多普勒天气雷达基本反射率(a)组合反射率(b)

个例分析:2016年6月13日大同市区出现强对流天气,17:20在4.2°仰角的基本反射率因子图上可以看到明显的三体散射和旁瓣回波(见图2.5a),对应在同时刻的组合反射率图上,这两个虚假回波都没有表现出来(见图2.5b)。

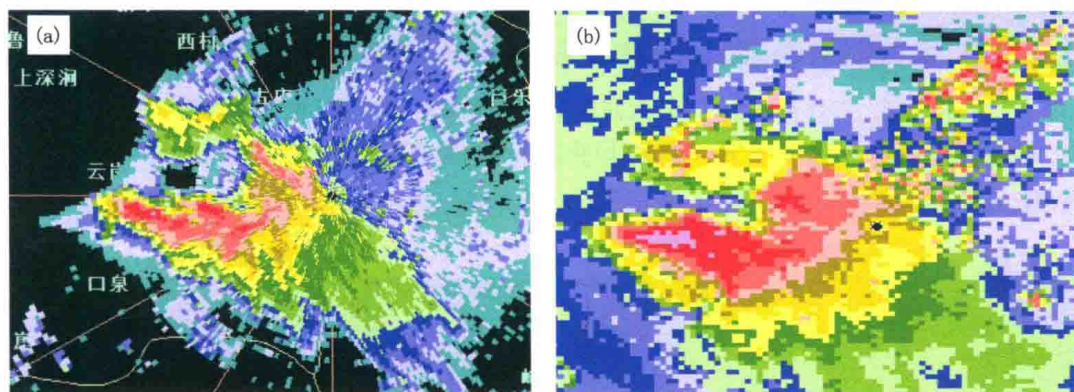


图2.5 2016年6月13日大同市区C波段多普勒天气雷达基本反射率(a)组合反射率(b)

## 2.6 垂直积分液态含水量

垂直积分液态水含量是将反射率因子数据转换成等价的液态水值,并且假定反射率因子是完全由液态水反射得到的。它反映了在降水云体中,某一确定底面积的垂直柱体内液态水总量分布特征,分辨率为2 km,探测范围可达230 km。

用途:能有效判断降水强度及其降水潜力,是判断强对流造成的暴雨、冰雹等灾害性天气的有效工具之一,并且能确定大多数强风暴的位置。

缺点:

(1)由于受到静锥区影响,距离测站 40 km 以内的值被过低估计。

(2)距离测站 220 km 以上区域会出现过高和过低估计的情况。

(3)地形因素,如山地遮挡,也会导致垂直积分液态水含量比实际值小。

(4)在运用过程中发现在春季和初夏对冰雹有一定的指示意义,但盛夏和初秋对冰雹指示性差,这可能是  $Z-M$  关系不稳定造成的。

个例分析:2016 年 6 月 13 日大同市出现强对流天气,18:25 垂直积分液态含水量图显示浑源县  $VIL > 40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (见图 2.6a),出现两次冰雹天气,最大直径 6 mm。冰雹过后垂直积分液态含水量值迅速降低(见图 2.6b)。垂直积分液态含水量值突增和锐减可以作为强天气的判断指标。

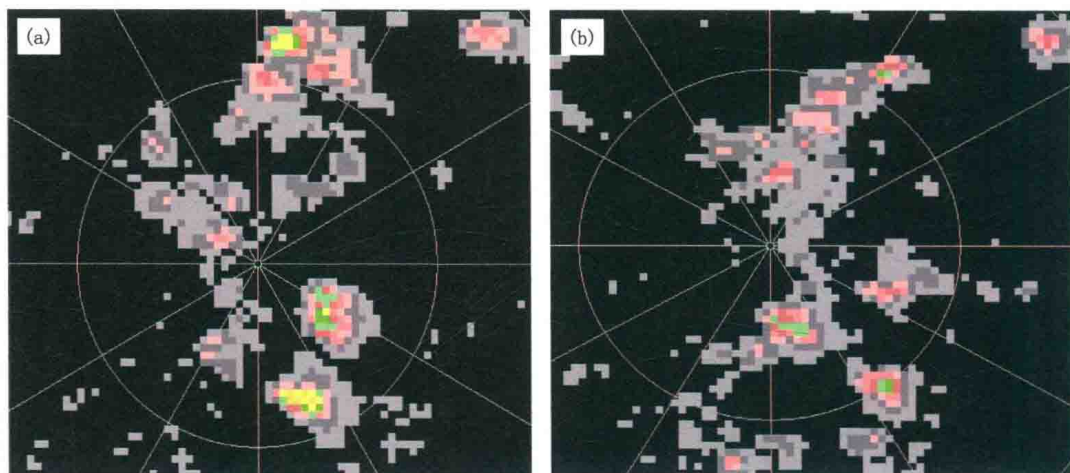


图 2.6 2016 年 6 月 13 日大同市 C 波段多普勒天气雷达降冰雹前(a)和降冰雹后(b)垂直积分液态含水量

## 2.7 风暴追踪信息

风暴追踪信息的重要作用是用来识别和跟踪风暴单体,识别出风暴单体以后能提供过去 1 小时每隔 15 分钟和未来 1 小时每隔 15 分钟的位置以及整个雷达反射率覆盖域内风暴运动信息。

用途:对风暴单体生消和移动方向有很好的指示作用,对提高短时临近预警预报准确率有很大帮助,是比较可靠的产品。

个例分析:2016 年 6 月 13 日大同市出现强对流天气,18:25 风暴追踪信息图上(见图 2.7),雷达识别出的 H4 就是给浑源县造成两次冰雹天气的风暴单体,它识别出的路径比较准确,可以作为强天气的判断指标。

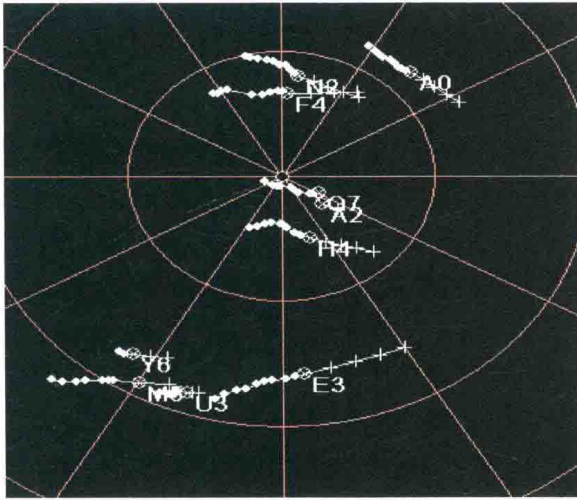


图 2.7 2016 年 6 月 13 日大同市 C 波段多普勒雷达探测到的风暴追踪信息

## 2.8 降水量产品

C 波段多普勒天气雷达与降水量有关的产品有三个,分别是 1 小时降水累计雨量、3 小时降水累计雨量和风暴总降水量。他们都是根据由经验确立的反射率因子和降水率  $R$  之间的幂指数关系计算的。这三个产品既不是降水实况也不是对未来的预报值,而是对过去降水时段的降水估测值,误差很大,在业务运用中要加以注意。

缺点:

(1)  $Z-R$  关系中的参数本身是可以调节的,但是到目前为止,还没有一个客观的具有确定性的指导原则,所以在临近降水开始前要想确定一个适当的参数是非常困难的。

(2) 在计算降水量时,应该将雨量计实况数据引入算法中,但截至目前这一想法并没有投入业务运行,由于没有实况数据支撑,误差很大。

个例分析: 2010 年 6 月 13 日 16:40 在大同县 CB 雷达观测到的 1 小时累计降水量图上,大同县在 15:40—16:40 有 19 mm 以上强降水(见图 2.8a),但实况只出现 0.1 mm 微量降水。

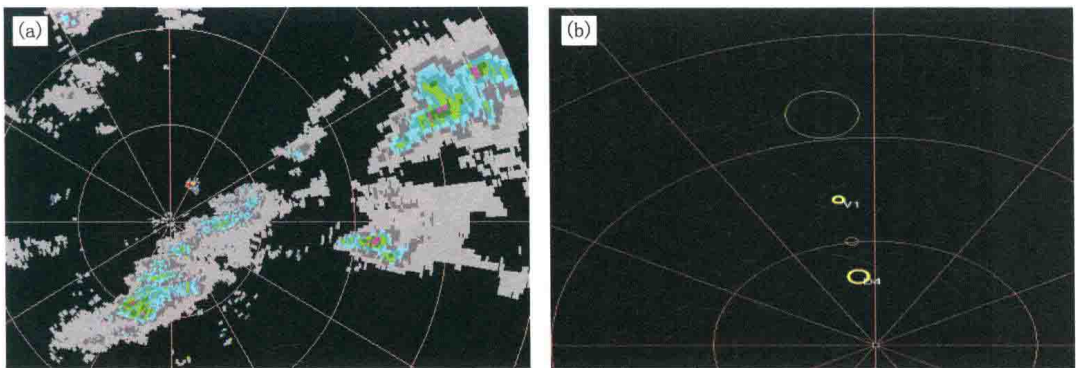


图 2.8 2010 年 6 月 13 日大同县 C 波段多普勒天气雷达探测到的 1 小时累计降水量图(a)和中气旋图(b)

## 2.9 中气旋

中气旋是直径一般为 2~10 km 并且与强雷暴上升气流相联系的旋转涡流。中气旋的出现与大冰雹、灾害性地面大风或龙卷相关联。在中气旋产品上,黄色圆圈的宽度为一个像素符号时表示的是三维相关切变,不带风暴单体标示号。黄色圆圈的宽度为四个像素的符号表示的是中气旋,带有离它最近的被识别到的风暴单体的标示号,标示号位于东南方用白颜色字标示。

个例分析:图 2.8b 为 2011 年 6 月 7 日 22:35 大同多普勒天气雷达探测到的中气旋产品,图中没有标识号的两个圆圈为三维相关切变,带标志号的为中气旋。图 2.9 为 2010 年 7 月 10 日 15:01 大同多普勒雷达探测到的中气旋及其剖面图,可以看到中气旋距离地面高度大约在 3 km 左右,呈现气旋性旋转,最大负速度  $-24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最大正速度  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,属于强中气旋。

缺点:

- (1)空报率较高。
- (2)时间提前量较小,预报出中气旋后一到两个体扫甚至同时强对流天气发生。

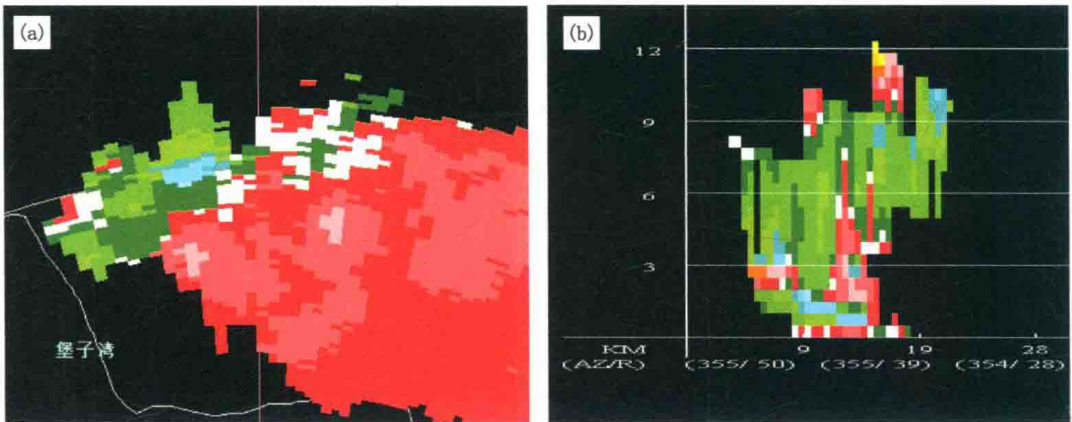


图 2.9 2010 年 7 月 10 日 15:01 大同多普勒雷达探测到的中气旋(a)及其剖面图(b)

个例分析:2011 年 6 月 7 日 22:47 中气旋图上(见图 2.10a),预报出四个带有标识号的中气旋,但实况只有标志号为 W3 的中气旋带来了强对流天气,由其对应的  $1.5^\circ$  仰角基本反射率因子可以看到回波呈现弓形,具有强对流天气的典型特征。

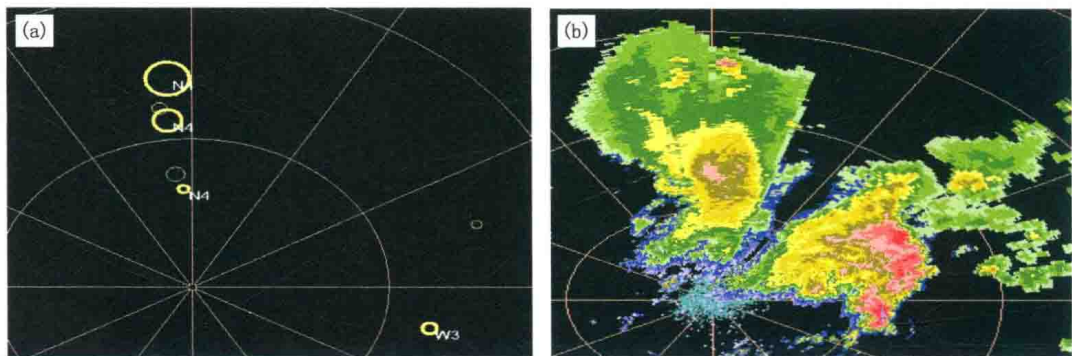


图 2.10 2011 年 6 月 7 日 22:47 大同雷达探测到的中气旋(a)及其对应的基本反射率(b)



## 2.10 垂直剖面图

垂直剖面图能够清楚地看到风暴单体从地面到高空的空间结构,由于多普勒天气雷达显示的方式选用了PPI而不是RHI,所以用户只能自己确定剖面位置,由PUP来完成剖面。在实际业务运用中最常用的剖面图是基本反射率因子剖面图和平均径向速度剖面图。

基本反射率因子剖面图用途:可以确定回波顶高、静锥区、回波悬垂、回波墙、 $0^{\circ}\text{C}$ 层及 $-20^{\circ}\text{C}$ 伸展高度、弱回波区或有界弱回波区及其上升气流高度等。

平均径向速度剖面图用途:可以判断低层辐合、风暴顶辐散、中层径向速度辐合、大风核、上升和下沉气流、中气旋及其伸展高度、零速度线高度及其倾斜程度、 $0\sim 6\text{ km}$ 垂直风切变、急流伸展高度等。

## 2.11 典型个例分析——解析一次超级单体(超单)风暴过程的维持机理

### 2.11.1 超单的演变和结构特征

#### 2.11.1.1 灾情及天气背景

来自晋中市气象局的灾情报告指出:2004年7月3日,16:40—20:30,榆次区61个自然村遭受大风、冰雹袭击。冰雹持续时间长达40 min,最大直径37 mm。全区受灾面积5713  $\text{hm}^2$ ,大秋作物、经济作物绝收,直接经济损失2728万元。

2004年7月3日08时500 hPa图上(图略),冷涡位于蒙古国,我国山西位于冷涡的底部,河西走廊北部到山西北部为强盛的偏西气流,蒙古冷涡底部分裂的冷空气,从酒泉经银川到太原表现为一支西北风向的中空急流,太原位于“急流头”,西北风 $11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,温度 $-11^{\circ}\text{C}$ ;850 hPa天气图上(图略),山西受两支气流影响,一支为山西西部的SW气流,一支为东部高压底部部的SE气流,两支气流在太原交汇。太原站为南风 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,温度 $21^{\circ}\text{C}$ ;太原本站风向随高度顺转,有中等强度的垂直风切变,对流有效位能 $E_{\text{CAP}}=3076\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,中空有冷空气辐合,低空有暖湿气流汇合,本站和上游站大气层结处于极端不稳定状态。

#### 2.11.1.2 风暴的演化

2004年7月3日13:04,强度为18 dBZ的对流单体在山西的昔阳县( $105^{\circ}, 92\text{ km}$ )生成,之后在其西北行过程中,13:54、14:36、15:12、16:08,在其西北部和北部共有6个对流单体生成、发展和并入。15:37,在风暴前进方向的左侧, $0.5^{\circ}$ 仰角图上呈现出典型的超单钩状回波结构,相应地在 $0.5\sim 4.3^{\circ}$ 仰角的 $V_r$ 图上出现了旋转速度达 $24.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强中气旋。沿入流方向穿过最强回波位置的R垂直剖面(见图2.11b)表现出明显的BWER(有界弱回波区)结构特征,表明超单在15:37形成。16:13,超单稳定在榆次区,不再北上,不再有新生单体并入。16:53, $C_{\text{VIL}}$ (垂直累积液态水含量)达到该次大冰雹过程的最大值 $82.3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (见图2.13),相应地垂直累积液态水含量密度为 $4.8\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,R强度达63 dBZ, BWER更加宽广(见图2.11c)。17:56,中等强度的中气旋演变为弱中气旋;18:01—18:22,弱中气旋仅在 $0.5^{\circ}\sim 1.5^{\circ}$ 仰角的浅薄气层残存(见图2.12);18:22后,中气旋消失,风暴解体。中气旋在风暴中的生命